

XIV Международная научно-практическая конференция студентов аспирантов и молодых учёных  
«Молодёжь и современные информационные технологии»

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИВОДА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕЗВЕШИВАНИЯ КРЫЛЬЕВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Маркелов И. А.

Томский политехнический университет  
iam14@tpu.ru

### Введение

В процессе изготовления космических аппаратов (КА) важным этапом являются наземные испытания различных узлов изделия. В них включаются испытания так называемых крупногабаритных трансформируемых систем: крыльев солнечных батарей (КБС), рефлекторов, антенн, манипуляторов. При этом одним из требований при проведении испытаний является имитация условий открытого космоса, в том числе и невесомости. С этой целью создаются системы обезвешивания. Параллельно с созданием стенда системы предлагается создание её математической модели, которая позволит прогнозировать процесс проведения испытаний и, в идеальном случае, полностью вытеснить полунатурные эксперименты.

### Описание моделируемой системы

Система обезвешивания КБС КА состоит из нескольких кареток, каждая из которых имеет три привода: вертикального, продольного и поперечного перемещения. Приводы продольного и вертикального перемещения предназначены для перемещения точки вывески троса таким образом, чтобы трос был всегда строго вертикален. Привод вертикального перемещения предназначен для создания обезвешивающей силы, направленной противоположно силе тяжести и создаваемой натяжением троса.

Привод вертикального перемещения состоит из серводвигателя, червячного редуктора и шпули. Для создания обратной связи использует датчик силы. Сигнал с датчика силы поступает на контроллер, который управляет напряжением обмоток серводвигателя.

Серводвигатель представляет собой вентильный двигатель, который выполняет роль моментного двигателя. В этом случае частота вращения ротора минимальна или равняется нулю. В таком случае для управления двигателем с помощью цифровых средств используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), при помощи которой создаётся среднее напряжение, близкое по своей форме к синусоидальному. [1]

Выбор червячного редуктора объясняется свойством самоторможения, которое проявляется как невозможность прокручивания выходного вала редуктора под действием силы с его стороны. [2] Это свойство вызвано наличием трения скольжения между витками червяка и зубьями червячного колеса. Оно позволяет избежать

разрушения конструкции при отключении питания в системе обезвешивания.

Датчик силы предназначен для замыкания цепи обратной связи и контроля силы натяжения троса.

Контроллер в данной системе выполняет функции цифровой вычислительной машины (ЦВМ), аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и цифровой регулятор. АЦП преобразует аналоговое напряжение, полученной с датчика силы, в цифровой код, с которым может работать ЦВМ. Затем происходит сравнение задающего сигнала с сигналом с АЦП и выработка регулятором сигнала для ЦАП. ЦАП преобразует цифровой код в аналоговое напряжение, подаваемое на обмотки серводвигателя. Одним из видов реализации ЦАП является использование ШИМ.

### Математическое описание непрерывных звеньев

Непрерывная часть системы состоит из двигателя постоянного тока, червячного редуктора, шпули и датчика силы.

Упрощённая передаточная функция двигателя постоянного тока:

$$W_{эд}(s) = \frac{M_{эд}(s)}{U_{эд}(s)} = \frac{k_{эд}}{(T_э s + 1)(T_м s + 1)},$$

где  $T_э$  - электрическая постоянная времени двигателя,  $T_м$  - механическая постоянная времени.

Передаточные функции редуктора, шпули и датчика силы представляют собой коэффициенты передачи:

$$W_{ред}(s) = \frac{M_{ред}(s)}{M_{эд}(s)} = k_{ред};$$

$$W_{ш}(s) = \frac{F(s)}{M_{ред}(s)} = \frac{1}{R_{ш}} = k_{ш};$$

$$W_{дс}(s) = \frac{U_{дс}(s)}{F(s)} = k_{дс}.$$

Операторно-структурная схема (ОСС) непрерывной части изображена на рис. 1.



Рис. 1. ОСС непрерывной части

Также в системе есть нелинейные характеристики. Они относятся к редуктору и вызваны его люфтом и сухим трением.

Характеристика типа "люфт" обуславливается наличием механических зазоров между зубьями червячного колеса и витками червяка. Вход-выходная характеристика звена изображена на рис. 2.

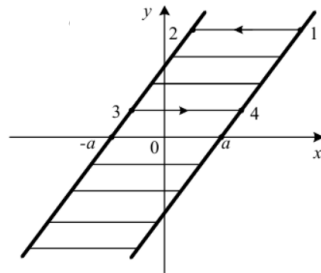


Рис. 2. Вход-выходная характеристика звена типа "люфт"

Второй нелинейностью является сухое трение которое обусловлено трением между зубьями колеса и червяком. Математически оно может быть описано как:

$$M_{cm} = M_{cm0} \operatorname{sign} \frac{d\alpha}{dt}$$

где  $M_{cm0}$  – момент сухого трения, приведённого к валу двигателя;

$\frac{d\alpha}{dt}$  – скорость вращения вала двигателя. [3]

#### Математическое описание управляющего контроллера

Контроллер можно разбить на три блока: АЦП, ЦВУ и ЦАП.

Вход-выходные характеристики АЦП и ЦАП представляют собой многоуровневое реле. Основной характеристикой АЦП и ЦАП являются разрядность. Поскольку современные преобразователи имеют высокую разрядность (>10), то можно их аппроксимировать пропорциональным звеном с коэффициентом  $k$ , при этом:

$$k_{\text{АЦП}} = \frac{1}{\delta_{\text{АЦП}}},$$

$$k_{\text{ЦАП}} = \delta_{\text{ЦАП}},$$

где,  $\delta_{\text{АЦП}}$  и  $\delta_{\text{ЦАП}}$  - разрядность АЦП и ЦАП.[4] Дополнительно на выходе ЦАП стоит экстраполятор нулевого порядка, имеющий непрерывную ПФ:

$$W_{\phi}(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s},$$

где  $T$  - период дискретизации.

ЦВМ представляет собой цифровой регулятор, описываемый дискретной передаточной функцией. Для настройки регулятора можно использовать желаемую непрерывную передаточную функцию всей системы. Для этого нужно заменить цифровой регулятор непрерывным, произвести его настройку и затем производится аппроксимация полученной непрерывной ПФ дискретной. Для этого могут быть использованы метод Тутсена или метод Эйлера. [5]

Другой способ исходит из обратного: преобразовать ПФ непрерывной части в дискретную и построить регулятор по желаемой дискретной ПФ.

Получившаяся в результате ОСС цифровой части изображена на рис. 3.

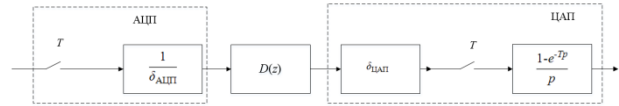


Рис. 3. ОСС цифровой части

#### Заключение

В полученной математической модели отображены основные связи и характеристики исследуемой системы. Для дополнения данной модели можно проделать следующее:

1. Использовать модель вентильного двигателя вместо модели коллекторного двигателя постоянного тока.
2. Учесть влияние упругости троса, на котором закрепляется изделие, поскольку трос сделан из эластичного кевлара.
3. Произвести более детальное рассмотрение нелинейных характеристик редуктора.

#### Список использованных источников

1. Овчинников, Игорь Евгеньевич. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) : курс лекций : учебное пособие / И. Е. Овчинников. — СПб.: Корона-Век, 2007. — 333 с.
2. Детали машин и основы конструирования : учеб. / С.М. Горбатюк [и др.] ; под ред. С.М. Горбатюка. — М. : Изд. Дом МИСиС, 2014.
3. Малышенко А. М. Математические основы теории систем: учебник для вузов //А. М. Малышенко. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 364 с. : ил.
4. Бесекерский, Виктор Антонович. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Профессия, 2004. — 747 с.: ил. — Специалист. — Литература: с. 744-747.
5. Ким, Дмитрий Петрович. Теория автоматического управления: Учебное пособие / Д. П. Ким. — М: Физматлит, 2003-2004 Т. 1. Линейные системы. — 2003. — 287 с.: ил. — Библиогр.: с. 280-281. — Предметный указатель: с. 282-287.